

# АППАРАТНЫЕ ПЛАТФОРМЫ NATIONAL INSTRUMENTS ДЛЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ И ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ В ЗАДАЧАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ, УПРАВЛЕНИЯ И ИЗМЕРЕНИЙ

В. А. Нестеров, П. А. Кривоzubов, А. С. Усеня, Р. М. Гаджимагомедов

*Московский Авиационный Институт  
(Национальный Исследовательский Университет),  
Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана  
(Национальный Исследовательский Университет)  
National Instruments Russia (Москва)*

Поступила в редакцию 20.12.2013 г.

**Аннотация.** В работе рассматриваются современные подходы к организации высокопроизводительных вычислительных систем с применением программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Показываются преимущества подобного рода систем и приводится пример их реализации на базе модульной платформы PXIe.

**Ключевые слова:** ПЛИС, системы реального времени, сбор данных, управление, PXIe.

**Annotation.** The modern approaches for development of high-performance computing systems with the use of FPGAs (Field Programmable Gate Arrays) are offered in the article. The advantages of such systems are shown and example implementation based on modular platform PXIe is given.

**Keywords:** FPGA, Real-Time Systems, data acquisition, control, PXIe.

## ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень прогресса постоянно повышает требования к программным и аппаратным средствам, задействованным при проведении вычислений и обработке сигналов, поступающих при проведении испытаний сложных технических объектов или при управлении ими. Данные требования можно условно разделить на несколько основных направлений:

*Повышение информативности:*

- Увеличение числа измерительных каналов и их типов;
- Повышение точности измерений сигналов (разрешение);
- Увеличение частоты опроса каналов;
- Обеспечение синхронности измерений;

*Интеллектуальные системы управления:*

- Реализация пользовательских циклограмм управления объектом;
- Обеспечение адаптивного регулирования и управления в реальном времени;
- Реализация высокоскоростных систем аварийной защиты.

Так же, в последнее время, все больше требований предъявляется к пользовательскому прикладному ПО, которое должно быть адаптировано или разработано индивидуально под каждый стенд или комплекс.

В качестве примера такого комплекса, рассмотрим некий объект с обратной связью и системой управления (рис. 1). В качестве такого крупномасштабного объекта может выступать стенд для испытания авиационных или ракетных двигателей, сложная физическая установка по типу токамака или ускорителя элементарных частиц и др.

Как видно из рисунка, для контроля состояния объекта используются сигналы разной физической природы. Общепринятым

подходом является разделение процессов по скорости их изменения. В случае типовой измерительной системы на базе испытательного стенда ракетного двигателя такими группами сигналов являются:

– Быстро меняющиеся сигналы с характерными требованиями по скорости оцифровки до 1 МГц/канал, и характерным числом на стенд до 100 каналов. В качестве примера такого рода сигналов можно привести акустические или вибрационные сигналы. Типовые информационные потоки, генерируемые такой группой сигналов составляют порядка 100 МБ/сек.

– Средне-меняющиеся сигналы с характерными требованиями по скорости оцифровки до 100 кГц/канал, и характерным числом на стенд до нескольких сотен каналов. В качестве примера такого рода сигналов можно привести сигналы с датчиков деформации, перемещения и т.п. Типовые информационные потоки, генерируемые такой группой сигналов составляют порядка 10–100 МБ/сек.

– Медленно-меняющиеся сигналы с характерными требованиями по скорости оцифровки до 1 кГц/канал, и характерным числом на стенд до нескольких тысяч каналов. В качестве примера такого рода сигналов можно привести сигналы с датчиков температуры, расхода и т.п. Типовые информационные потоки, генерируемые такой группой сигналов составляют порядка 1–10 МБ/сек.

Согласно традиционным представлениям в реализации подобных систем, все эти сигналы должны поступить на системы сбора

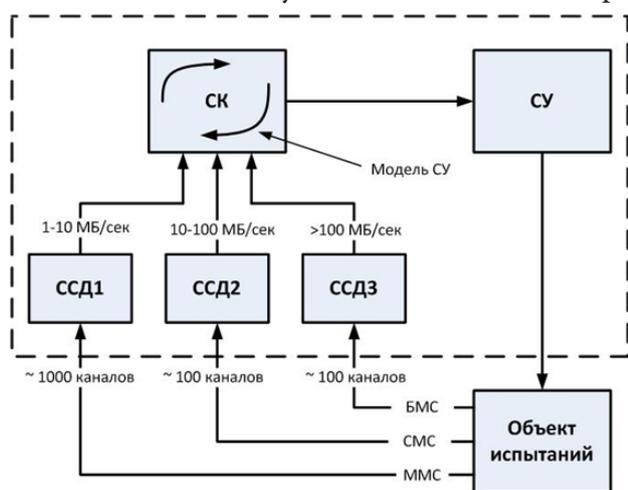


Рис. 1. Схема системы управления

данных (ССД) и далее на суперкомпьютер (СК), в котором развернута модель системы управления объектом (СУ), а также модель предсказания состояния объекта и реализация системы аварийной защиты. На основе анализа сигналов, модель СУ генерирует уставки, которые в свою очередь поступают на систему управления и уже она осуществляет посылку данных сигналов на объект, в качестве обратной связи.

Основной проблемой при реализации подобного рода систем является обеспечение синхронного приема без потерь больших потоков информации в суперкомпьютер и осуществление высокоскоростных вычислений в реальном времени (желательно в темпе поступления информации, т.е. с частотой расчета цикла управления до 100 кГц и выше) для реализации алгоритмов управления.

Учитывая большое количество каналов и передаваемых данных можно выделить несколько подходов к решению данной задачи. Первый подход, это использование в системах сбора данных АЦП, реализованных на базе шины PCIe, и передачи данных в суперкомпьютер по высокоскоростному Ethernet. Однако данный подход не позволит реализовать обработку данных с большого количества каналов, так как с увеличением числа каналов разработчики достигнут предельного объема данных, которые можно передать по каналу Ethernet. Кроме этого основной проблемой в данном случае является тот факт, что даже использование 1–10 Гбит/сек каналов Ethernet не обеспечит временного детерминизма исполнения циклов управления на суперкомпьютере в силу высокой латентности сетей Ethernet и их недетерминированности.

Альтернативным подходом на сегодняшний день является использование систем реального времени для синхронизации между каналами, ПЛИС – для реализации распределенных алгоритмов управления и вычислений и цифровых сигнальных процессоров для обработки сигналов. Однако и он имеет ряд ограничений, так как, используя цифровые сигнальные процессоры можно достигнуть предела возможностей, обусловленных мощностью процессора и другими его характеристиками.

В настоящее время существуют и другие подходы к решению данных проблем. В частности подход использования модульных систем на базе ПЛИС, предлагаемый компанией National Instruments? сочетает в себе все достоинства вышеперечисленных методов (такие как возможность работать в реальном времени и наличие ПЛИС), но при этом лишен вышеозначенных недостатков, таких как ограничение пропускной способности канала передачи данных. Помимо этого данный подход значительно упрощает и ускоряет процесс разработки приложений, а так же уменьшает количество компонентов всей системы в целом.

Данным решением является применение платформ, использующих модульный принцип формирования: PXI и CompactRIO.

## ПЛАТФОРМА PXI

PXI – это модульная платформа, предназначенная для создания многофункциональных и высокопроизводительных автоматизированных измерительных систем. В основе PXI-платформы лежат стандартные компьютерные технологии: шина PCI/PCI Express, процессор и периферийные устройства, а также система синхронизации компонентов. Архитектура PXI включает в себя шасси, в которое устанавливаются модульные приборы, контроллеры или интерфейсы для удаленного управления платформой (рис. 2).

Компания National Instruments и другие мировые производители предлагают широкий спектр контрольно-измерительных приборов стандарта PXI. Данные приборы могут поставляться с готовым программным обе-

спечением для использования в настольных измерительных комплексах, а также программироваться в LabVIEW или традиционных языках программирования для создания масштабных контрольно-измерительных комплексов. Перечень модульных приборов для стандарта PXI очень многообразен и включает в себя приборы для измерения физических величин, цифровые мультиметры, программируемые источники питания, генераторы/анализаторы цифровых сигналов, векторные генераторы/анализаторы ВЧ-сигналов, усилители и аттенюаторы радиосигналов, векторные анализаторы цепей, модуляторы и демодуляторы на базе ПЛИС, и др.

Платформа PXI позволяет объединить до 17 модулей в одном шасси и синхронизировать их работу с точностью до 20 пс. Данная система обеспечивает высокую надежность, быстродействие реального времени, а также большое число каналов аналогового и цифрового ввода/вывода.

Для реализации имитаторов, систем сбора данных и управления, а также для проведения высокопроизводительных вычислений необходимо в одном форм-факторе сочетать, как возможность работать в реальном времени, так и наличие мощных вычислителей на базе ПЛИС. Компания National Instruments предлагает систему PXI с высокопроизводительными модулями R-серии на базе ПЛИС Xilinx 5-ого и 6-ого поколений, программируемых в среде LabVIEW [1].

Каждый модуль R-серии имеет встроенную микросхему ПЛИС для обработки сигналов в режиме реального времени и детерминированного во времени исполнения алгоритмов управления. ПЛИС конфигурируется в визуальном режиме средствами среды графической разработки LabVIEW. Кроме того модули имеют встроенные (до 8 шт.) АЦП и ЦАП с частотой опроса до 1 МГц на каждый канал, позволяя настроить собственную частоту дискретизации и реализовывать независимую систему запуска измерения на каждом канале.

Типовое время исполнения цикла регулирования на такой микросхеме определяется ее тактовой частотой и составляет величины

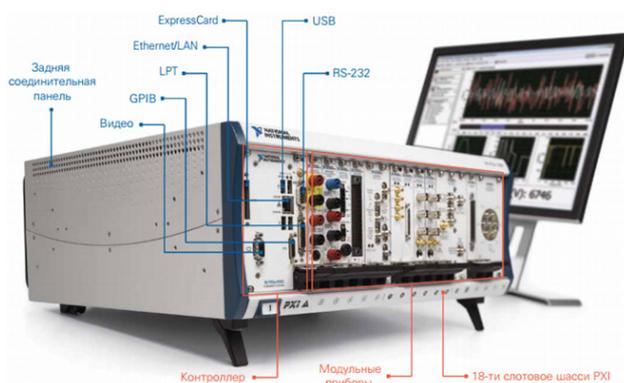


Рис.2. Внешний вид шасси PXI

порядка 10–25 нс. При этом исполнение кодов на базе ПЛИС в отличие от процессоров является строго детерминированным во времени и не зависит от наличия и работы операционной среды.

Основным применением модулей R-серии является сбор и формирование сигналов с использованием различных алгоритмов управления и обработки в реальном времени. В частности, модули R-серии могут использоваться для реализации специализированных алгоритмов и математических моделей, имитирующих работу разнообразных функциональных узлов: двигателей, турбин и т.д. с целью построения систем аппаратно-программного моделирования (НПМ) для испытаний штатных (бортовых) блоков управления и контроля.

Существенным преимуществом такого подхода является возможность установки в одном шасси до 17 такого рода вычислителей с возможностью их высокоточной синхронизации и обеспечением обмена данными между ними на скоростях до 800 МБ/сек. Использование нескольких шасси позволяет создавать мощные вычислительные кластеры реального времени, дополненные функциями сбора и генерации сигналов.

Платформа PXI так же может включать в себя специализированные модульные приборы (например модули высокоскоростного цифрового ввода/вывода или анализаторы и генераторы ВЧ-сигналов), осуществляющие воспроизведение и запись больших объемов данных. Высокоскоростные RAID-массивы компании National Instruments обеспечивают прямой доступ к секторам памяти и высокую скорость чтения/записи (до 750 МБ/с).

В качестве расширения возможностей систем PXI можно задействовать технологию NI FlexRIO [2]. NI FlexRIO – это прибор PXI/PXI Express, состоящий из модуля с программируемой ПЛИС Xilinx 7-ого поколения для цифровой обработки данных и адаптерного модуля для ввода/вывода аналоговых и цифровых сигналов (рис. 3).

Так же существенным достоинством таких систем является возможность реализации межмодульной передачи данных P2P, где FlexRIO используется в качестве сопроцессора. Благодаря такой возможности, NI FlexRIO позволяет передавать данные между модулями в крейте PXIe со скоростью до 800 МБ/с без использования ресурсов контроллера. К таким модулям могут относиться оцифровщики сигналов, анализаторы спектра или генераторы произвольных сигналов.

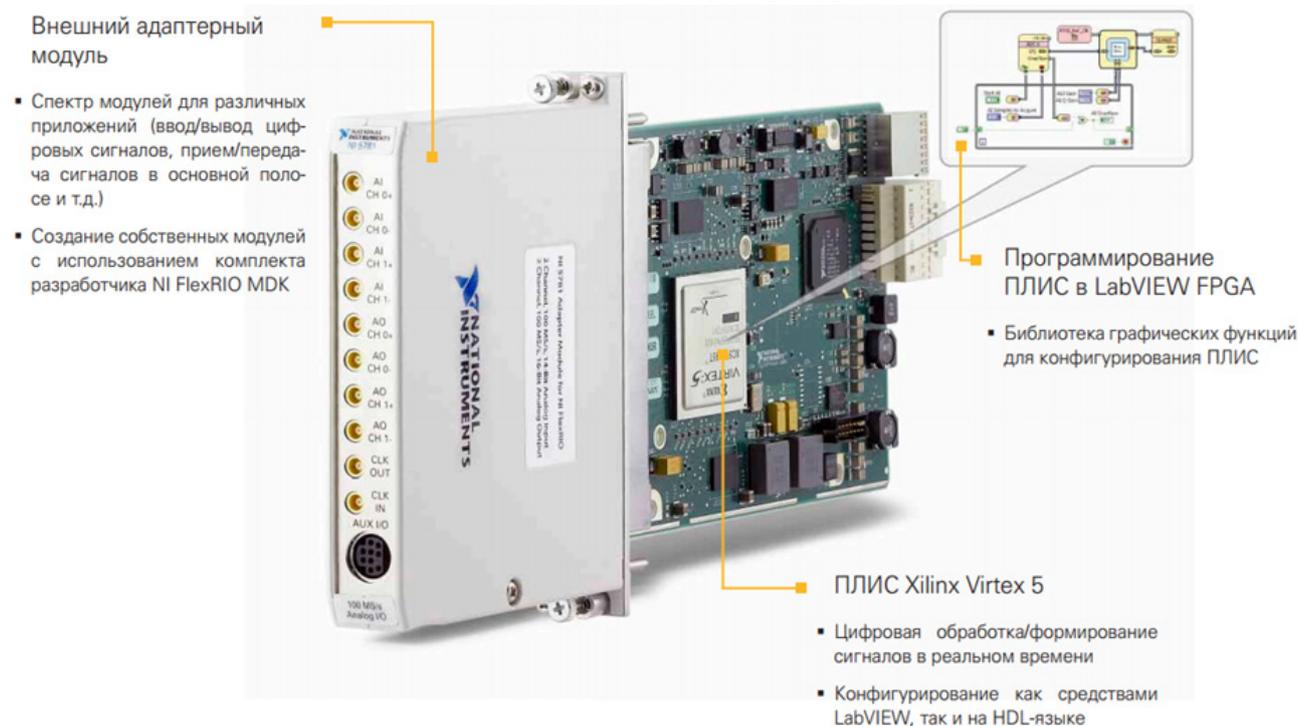


Рис. 3. NI FlexRIO

## ПЛАТФОРМА NI CompactRIO

Другая промышленная измерительная платформа NI – CompactRIO. Данная платформа, так же как и платформа PXI является модульной и позволяет эффективно построить законченное решение для системы ввода/вывода сигналов, испытательного стенда или промышленной автоматики с широкими возможностями (рис. 4.).



Рис. 4. Внешний вид шасси CompactRIO с модулями

CompactRIO представляет собой реконфигурируемую систему ввода/вывода, с возможностью установки в нее контроллера реального времени, и наличием ПЛИС Xilinx 5-ого поколения, сочетающую в себе надежность встраиваемых систем и поддержку ряда промышленных сертификатов соответствия работе в жестких условиях. Системы на базе CompactRIO могут использоваться в диапазоне температур от  $-40$  до  $+70$  °C в потенциально опасном и взрывоопасном окружении (Class I, Div 2) и выдерживают ударные нагрузки до 50 g. Большинство модулей имеют изоляцию до 2300 Vrms. Каждый из компонентов поставляется вместе с набором международных сертификатов безопасности, электромагнитной совместимости (EMC) и рядом климатических и имеющих отношение к окружающей среде сертификатов.

Каждый модуль ввода/вывода CompactRIO включает в себя встроенную систему согласования сигналов для непосредственной работы с сигналами тока и напряжения, датчиками температуры, давления, вибрации, звука, деформации, перемещения и т.п. Наличие в модулях встроенной системы согласования сигналов, а также поддержка расширенного

диапазона напряжений и различных промышленных типов сигналов позволяет напрямую подключать к модулям датчики и управляемые устройства.

Программное обеспечение NI VeriStand, используемое совместно с предлагаемой системой, позволяет настроить все каналы ввода/вывода сигналов PXI или CompactRIO, загрузить математическую модель объекта, настроить исходные параметры тестовых воздействий, а также отображение и запись выходных сигналов тестируемого объекта.

Так как на всех контроллерах PXI в стандартном варианте установлена ОС Windows, можно проводить весь цикл разработки на одной платформе, подключив все необходимые периферийные устройства (датчики, формирователи сигналов, приводы и т.д.) для отладки своего приложения.

В качестве единой платформы при создании ПО сбора данных, обработки сигналов, моделирования и управления – на всех этапах создания систем выступает среда разработки LabVIEW [3], позволяющая самостоятельно создавать прикладные программы для любого типа приборов, используя в этих целях множество готовых встроенных функций измерения и управления. Среда LabVIEW благодаря наглядному блок-схемному подходу и функциональности полноценного языка программирования является одним из наиболее удобных средств создания приложений для систем на базе PXI и CompactRIO (рис. 5).

В дополнение к основной среде разработки LabVIEW, компания National Instruments предлагает широкий спектр специализированных модулей, позволяющих запускать приложения под ОС реального времени и реализовывать некоторые особо критичные по времени исполнения части графического кода на высокопроизводительных ПЛИС в модулях R-серии, FlexRIO или Compact RIO.

LabVIEW Real-Time Module предназначен для запуска приложений в LabVIEW на контроллерах PXI или Compact RIO под управлением ОС реального времени, таких как VxWorks, Phar Lap или Linux RT. Данный модуль характеризуется высокой надежно-

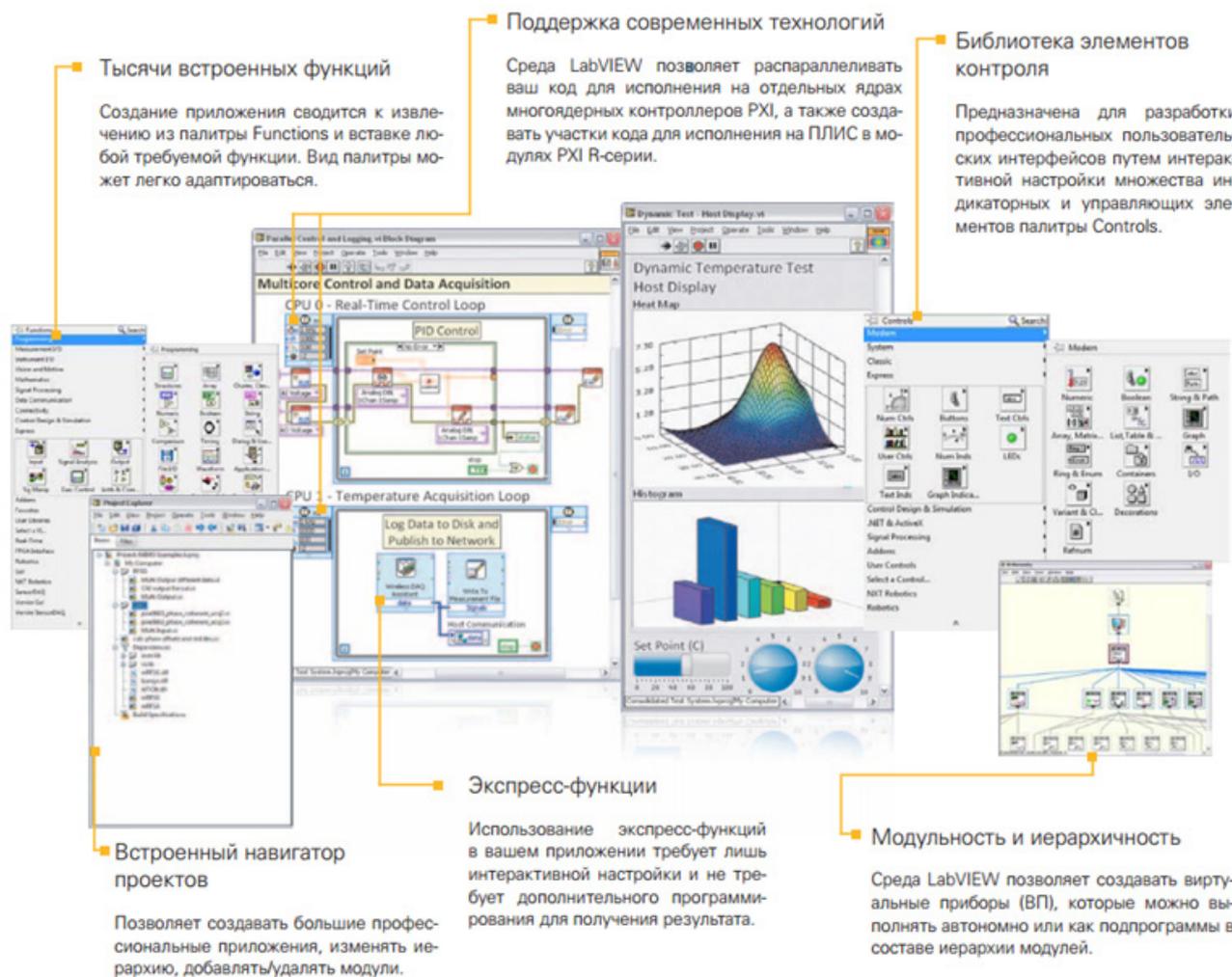


Рис. 5. Основные возможности среды LabVIEW

стью и детерминизмом работы приложения реального времени. При этом джиттер при исполнении рабочих циклов программы составляет порядка нескольких микросекунд, что является одним из лучших показателей в отрасли.

LabVIEW FPGA Module предназначен для программирования ПЛИС в графической среде разработки LabVIEW без использования HDL-языков, что значительно упрощает разработку. Данный модуль имеет в своем составе более 100 готовых функциональных блоков для снижения затрат на разработку (БПФ, окна и т. д.) и поддержка HDL-скриптов. Функции аналогового и цифрового ввода/вывода реализуются методом Drag and Drop, и для их реализации инженером не требуется специального знания сложного синтаксиса языков для программирования ПЛИС.

Помимо этого в LabVIEW есть множество специализированных модулей для реализации алгоритмов ПИ, ПД и ПИД-регулирования, интерактивного анализа и реализации БИХ и КИХ фильтров, для оптимизированного Фурье-анализа, реализации видов модуляции и т.д.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представленный в статье подход к реализации высокопроизводительных вычислительных систем для создания систем управления сложными техническими объектами на базе ПЛИС, является на сегодняшний день одним из перспективных направлений в области разработки САУ. Временной детерминизм и скорость исполнения кодов на базе ПЛИС, а также возможность построения вычислительных кластеров на

базе платформы PXI/PXIe делают данное направление одним из самых быстроразвивающихся, наряду с такими подходами как использование сигнальных процессоров (DSP) и графических процессоров (GPU) в вычислительных системах.

**Нестеров Виктор Антонович** – д.т.н., профессор, кафедра «Авиационные робототехнические системы», Московский Авиационный Институт (Национальный Исследовательский Университет).

**Кривоzubов Павел Александрович** – ассистент, кафедра «Защита информации», Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана (Национальный Исследовательский Университет).

**Усеня Алексей Сергеевич** – технический специалист, National Instruments Russia.

**Гаджимагомедов Расул Магомедкамилович** – инженер проектов, National Instruments Russia.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федосов В. П., Нестеренко А. К. Цифровая обработка сигналов в LabVIEW.: ДМК-пресс, 2011. – 55 с.

2. Батоврин В. К., Бессонов А. С., Мошкин В. В., Папуловский В. Ф. LabVIEW. Практикум по основам измерительных технологий. – М. : ДМК-пресс, 2011. – 301 с.

3. Трэвис Дж., Кринг Дж. LabVIEW для всех. – М. : ДМК-пресс, 2010. – 123 с.

**Nesterov Viktor Antonovich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of «Aviation Robotic Systems», Moscow Aviation Institute (National Research University).

**Krivozubov Pavel Aleksandrovich** – lecturer, Department of “Information Security”, Bauman Moscow State Technical University (National Research University).

**Usenya Alexey Sergeevich** – Technical Specialist, National Instruments Russia.

**Gadzhimagomedov Rasul Magomedkami-lovich** – Project Engineer, National Instruments Russia.